

УДК 537.52, 533.6.011

Особенности излучения объемного наносекундного разряда в воздухе при взаимодействии с плоской ударной волной

А. Ю. Кузнецов, И. В. Мурсенкова

Экспериментально исследовано излучение импульсного комбинированного объёмного разряда с плазменными электродами в воздухе длительностью ~300 нс в присутствии плоской ударной волны внутри разрядного объема и после выхода ударной волны за его пределы. Проведена регистрация излучения разряда с наносекундным разрешением при числах Маха ударной волны 3—3,5, начальном давлении перед фронтом волны 10—30 Торр, напряжении 25—30 кВ. Обнаружен двухступенчатый характер затухания свечения плазменной области длительностью более 2000 нс после взаимодействия с фронтом ударной волны. Проанализированы кинетические процессы, приводящие к продолжительному излучению узкой зоны вблизи фронта ударной волны после прекращения тока разряда.

PACS: 52.80.-s, 52.30.-q

Ключевые слова: наносекундный объёмный разряд, динамика излучения, время затухания, электронно-оптическая камера, плоская ударная волна.

Введение

Изучение взаимодействия ударных волн с газоразрядной плазмой, связанное с задачами плазменной аэродинамики, остается актуальной задачей на протяжении последних десятилетий [1—6]. Для того чтобы осуществлять плазменное воздействие на высокоскоростные потоки, необходимо знать механизм взаимодействия ударной волны с плазменной областью. Однородный энерговклад в газ возможен при организации объемного разряда в диффузной форме, когда область неравновесной плазмы формируется в течение десятков наносекунд [7—10]. Влияние стационарных и частотных разрядов микросекундной длительности на течения с ударными волнами связано, в основном, с тепловым действием разряда [1—3]. Эксперименты и численные расчеты показали ускорение ударных волн в плазменной области, ослабление интенсивности, расширение фрон-

та [1, 2]. В тлеющем разряде структура фронта ударной волны изменяется в плазменной области и восстанавливается после выхода из нее; скорость движения ударной волны в разрядном объеме в молекулярном газе выше, чем в атомарном [3].

Особенностью воздействия наносекундных разрядов на высокоскоростные течения является быстрое изменение состояния газа в разрядной области за короткое время и его быстрый нагрев в результате импульсного энерговклада. Это приводит к распаду газодинамического разрыва на границе газ-плазма, приводящему к образованию ударных волн, контактных поверхностей и волн разрежения и дальнейшему взаимодействию этих возмущений с потоком [4, 5]. Присутствие ударных волн в разрядном объеме может также приводить к изменению режима протекания тока разряда [5, 6, 11].

Несмотря на достаточно большой объем экспериментальных материалов, не существует единого мнения о процессах, происходящих вблизи фронта ударной волны как во время протекания тока разряда, так и в послеразрядный период. Остается актуальным получение информации о механизме взаимодействия фронта ударной волны с газоразрядной плазмой.

Комбинированный объемный разряд с плазменными электродами длительностью несколько сотен наносекунд ранее исследовался в неподвижном воздухе и в газодинамическом потоке с пло-

Кузнецов Александр Юрьевич, аспирант.
 Мурсенкова Ирина Владимировна, доцент.
 Московский государственный университет
 им. М. В. Ломоносова. Физический факультет.
 Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, стр. 2.
 Тел. (495) 939-44-28.
 E-mail: kuznecov.alexander15@gmail.com;
 murs_i@physics.msu.ru

Статья поступила в редакцию 11 мая 2016 г.

© Кузнецов А. Ю., Мурсенкова И. В., 2016

ской ударной волной [11]. Было показано, что в области фронта ударной волны свечение разряда усиливается, его длительность может превышать 2 мкс.

Целью данной работы было проведение экспериментов по регистрации излучения комбинированного объёмного разряда с наносекундным разрешением в присутствии плоской ударной волны в разрядном объеме и за его пределами. Эксперименты проводились при числах Маха ударных волн 3—3,5, давлении воздуха перед фронтом 10—30 Торр. Импульсное напряжение, прикладываемое к системе электродов разряда, составляло 25—30 кВ. Определялись различия в характере излучения разряда в присутствии фронта ударной волны и в неподвижном однородном воздухе, в частности различия времен затухания излучения. На основе полученных результатов анализировались физико-химические процессы, обуславливающие послесвечение после взаимодействия разрядной области с фронтом ударной волны.

Экспериментальная установка и условия проведения экспериментов

Исследования проводились на экспериментальной установке, состоящей из ударной трубы и разрядной камеры [11]. Импульсный комбинированный объёмный разряд с предыонизацией ультрафиолетовым свечением от двух плазменных электродов инициировался в разрядной камере. Разряды такого типа применяются в газоразрядных и эксимерных лазерах [12, 13]. Питание разряда осуществлялось от конденсатора емкостью 2100 пФ, заряжаемого до рабочего напряжения 25—30 кВ и коммутируемого управляемым разрядником. При приложении импульсного напряжения к системе электродов на верхней и нижней стенках разрядной камеры на расстоянии 24 мм друг от друга формировались импульсные скользящие разряды площадью $30 \times 100 \text{ мм}^2$ (плазменные листы) [14]. Они обеспечивали предыонизацию объема между ними и выполняли роль электродов объёмного разряда. После достижения достаточной концентрации электронов формировался объёмный разряд.

Эксперименты проводились при различных положениях фронта плоской ударной волны относительно края разрядного объема: от 20 мм до 0 внутри разрядного объема и до 15 мм при выходе за пределы разрядного объема. При нахождении фронта ударной волны в разрядном объеме в момент приложения импульсного напряжения разряд инициируется перед фронтом волны, в области низкого давления и, соответственно, высокого

значения приведенной напряженности электрического поля [5, 11]. Ток разряда при этом проходит по газу перед фронтом ударной волны и по плоскости фронта (рис. 1, а). При нахождении ударной волны за пределами разрядного промежутка ток разряда проходит по плоскости фронта и по каналам поверхностного разряда, расположенным в плоскости плазменных электродов. Область объёмного разряда в этом случае ограничена узкой зоной перед фронтом ударной волн. Отметим, что за время протекания тока разряда фронт ударной волны смещается не более чем на 0,5 мм.

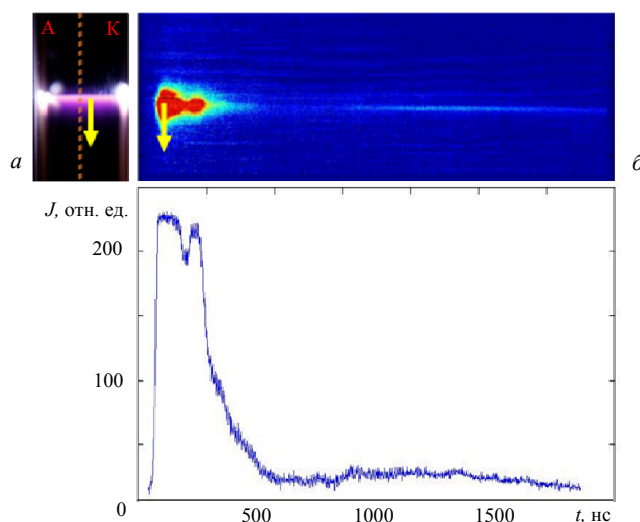


Рис. 1. Фотоизображение разряда с фронтом ударной волны на краю разрядного объема (а), пунктиром показано положение щели камеры K008; развертка свечения и зависимость интенсивности свечения от времени (б). Длительность развертки 2000 нс. Вертикальный масштаб развертки 42 мм. Стрелка показывает направление движения ударной волны. Число Маха 3,23, давление перед фронтом 20 Торр.

С помощью высокоскоростных камер БИФО K008 и K011 в экспериментах были получены развертки свечения разряда и девятикадровые изображения соответственно. Камера K008 в режиме линейной развертки регистрировала временную развертку изображения разряда, попадающего в щель камеры шириной 100 мкм перпендикулярно фронту ударной волны (см. рис. 1, а). Спектральный диапазон чувствительности фотокатода камер 370—850 нм. Одновременно регистрировались спектры излучения с помощью спектрометра AvaSpec-2048FT (диапазон длин волн 200—1100 нм), ток разряда с помощью малоиндуктивного шунта специальной конструкции, фотоизображения (фотокамерой Canon EOS 550D). Скорость ударных волн измерялась базовым методом по сигналам пьезоэлектрических датчиков давления в канале ударной трубы, синхронизация процессов в экспериментах осуществлялась также с помощью этих сигналов.

Развертки свечения в неподвижном воздухе и в присутствии ударной волны обрабатывались с помощью специальной программы. Выбиралась линия, проходящая по области максимального свечения, и область усреднения. В результате получались зависимости относительной интенсивности свечения от времени (рис. 1, б), путем обработки которых определялись времена затухания свечения. Так как спад излучения разряда происходит по экспоненциальному закону, полученные экспериментально временные зависимости логарифмировались для нахождения времени затухания. Таким же образом были получены времена затухания свечения разряда в неподвижном воздухе при давлениях 10—120 Торр, напряжениях 20—30 кВ. По девятикадровым изображениям свечения разряда в присутствии ударной волны анализировалось пространственное распределение свечения и определялись положение области максимального свечения относительно края разрядного объема и скорость ее перемещения.

Результаты исследования

Спектральные исследования разряда в неподвижном воздухе и в потоке воздуха с ударной волной показали, что основной вклад в излучение объемной фазы разряда дает вторая положительная система азота, соответствующая переходам $C^3P_u \rightarrow V^3P_g$ (281—498 нм) [11, 14]. В присутствии фронта ударной волны интенсивность излучения выше, чем в неподвижном воздухе. Фотокамера и электронно-оптические камеры регистрируют часть спектра излучения.

Длительность тока разряда в неподвижном воздухе составляет около 300 нс. Основная часть энерговклада приходится на первый полупериод тока (~130 нс). Длительность излучения не превышает 170 нс. Рассчитанные времена затухания излучения в неподвижном воздухе при давлении 10 Торр оказались близки к времени жизни возбужденного уровня C^3P_u молекулы азота (37 нс [15, 16]). С ростом давления воздуха до 120 Торр время затухания свечения уменьшалось.

В присутствии ударной волны внутри разрядного объема при инициировании разряда длительность тока разряда составляла около 500 нс. Основной энерговклад в газ происходил в течение 400 нс, а длительность свечения превышала 2000 нс. Девятикадровые изображения, регистрируемые камерой БИФО К011 в течение 1700 нс после разряда, показали, что излучение разряда сосредоточено вблизи фронта ударной волны и движется в том же направлении. Свечение узкой плоской зоны продолжается и после ее выхода за пределы

разрядного объема. Развертка свечения разряда с фронтом ударной волны внутри разрядного объема представляет собой узкую линию, соответствующую свечению около фронта ударной волны (рис. 1, б). Так как эта зона движется, развертка имеет наклон. В начале развертки (во время протекания тока разряда) наблюдаются пульсации, связанные с осцилляциями тока. Далее (после прекращения тока разряда) затухание свечения носило двухступенчатый характер: сначала наблюдалось затухание, затем нарастание свечения и последующее затухание (рис. 1, б). Время затухания составляло 200—450 нс на первом интервале (до 1000 нс) и 600—1000 нс на втором (от 1000 нс). Эти времена слабо зависели от положения ударной волны в разрядном объеме, что указывает на сходство кинетических процессов, приводящих к повторному возникновению и последующему затуханию свечения в разных экспериментах.

Скорость движения светящейся зоны, измеренная по разверткам и 9-кадровым изображениям, составляла около 600 м/с в случае, когда ударная волна находилась внутри разрядного объема. Это значение меньше скорости фронта исходной ударной волны (~1100 м/с) и скорости потока за ней (~800 м/с). Максимальное значение скорости движения светящейся зоны (1000 м/с) наблюдалось в экспериментах, когда фронт исходной ударной волны находился на краю разрядного объема. При нахождении фронта ударной волны за пределами разрядного объема скорость движения светящейся зоны становилась тем меньше, чем дальше располагался фронт ударной волны относительно конца разрядного промежутка в момент инициирования разряда. Найденные особенности, очевидно, связаны с различием в распаде газодинамических разрывов при импульсном энерговкладе в газ вблизи фронта ударной волны. В случае значительного энерговклада в узкую область перед фронтом ударной волны происходят два распада разрыва: на границе, содержащей фронт УВ и на границе плазма разряда-покоящийся воздух [5]. В результате после распада разрывов одна из образовавшихся ударных волн движется по области плазмы, сжимая ее. Скорость этой ударной волны превышает скорость исходной. В результате ее движения образуется узкая плоская область с повышенной концентрацией частиц в возбужденных состояниях.

Анализ свечения

Для анализа свечения длительностью свыше 2000 нс после взаимодействия разряда с фронтом ударной волны рассматривалась кинетика возбуж-

дённных состояний молекулы азота после прекращения тока. Послесвечение разрядов в воздухе и азоте связано с достаточно долгим временем существования (более 5 мкс) возбуждённых электронно-колебательных состояний азота [15, 16]. Так как излучение разряда определяется второй положительной системой азота, анализировалось заселение излучающего состояния $C^3\Pi_u$ молекулы азота. Основной вклад в заселение этого состояния в отсутствие электрического поля вносят столкновения возбужденных молекул в метастабильных состояниях $V^3\Pi_g$ и $A^3\Sigma_u^+$. Происходят в основном реакции тушения состояния $C^3\Pi_u$ возбужденной молекулы азота до состояния $V^3\Pi_g$ и реакции заселения уровней $C^3\Pi_u$ и $V^3\Pi_g$ при столкновениях $V^3\Pi_g$ с $A^3\Sigma_u^+$ [16, 17]. Была проведена оценка скоростей и времен протекания реакций, которые могут вносить вклад в излучение в течение 2000 нс после разряда. В пренебрежении малыми величинами (на выбранном временном интервале) было получено уравнение баланса частиц излучающего состояния $C^3\Pi_u$ азота:

$$\frac{dN_C}{dt} = -AN_C + K_{AA}N_A^2$$

где N_C , N_A — концентрации состояний $C^3\Pi_u$ и $A^3\Sigma_u^+$ соответственно, K_{AA} — константа скорости реакции заселения состояния $C^3\Pi_u$ при столкновениях возбужденных молекул азота в метастабильных состояниях $A^3\Sigma_u^+$. В правой части уравнения первое и второе слагаемые включают реакции тушения и заселения состояния N_C .

На основании полученного уравнения был проведен расчет концентрации возбужденного состояния молекулы азота N_C на временном интервале 2000 нс после разряда. Начальные концентрации возбужденных состояний брались из [18], где моделировался импульсный объемный наносекундный разряд в воздухе. Константы скоростей процессов выбирались из [16, 17]. Концентрация молекул в состоянии N_A перед фронтом ударной волны полагалась спадающей во времени по закону, близкому к экспоненциальному, в соответствии с результатами [18]. В расчете учитывалось, что концентрация возбужденных частиц повышается за счет ударного сжатия плазменной области в результате прохождения ударной волны.

Расчитанная заселенность состояния $C^3\Pi_u$ показана на рис. 2. Видно хорошее соответствие расчетной зависимости и динамики излучения после разряда, когда в течение 200 нс наблюдается возрастание интенсивности излучения, а затем ее спад с характерным временем около 600 нс. (Ток $I(t)$ на рисунке нормирован на максимум; интенсивность свечения $J(t)$ и расчетная зависимость $N_C(t)$ — на максимальное значение после разряда.) Так как интенсивность излучения пропорциональна концентрации молекул в возбужденном состоянии $C^3\Pi_u$, то расчетная зависимость достаточно хорошо описывает экспериментальную динамику свечения в области фронта ударной волны. Без учета взаимодействия плазменной области с ударной волной расчет дает монотонный спад заселенности излучающего состояния после окончания разряда.

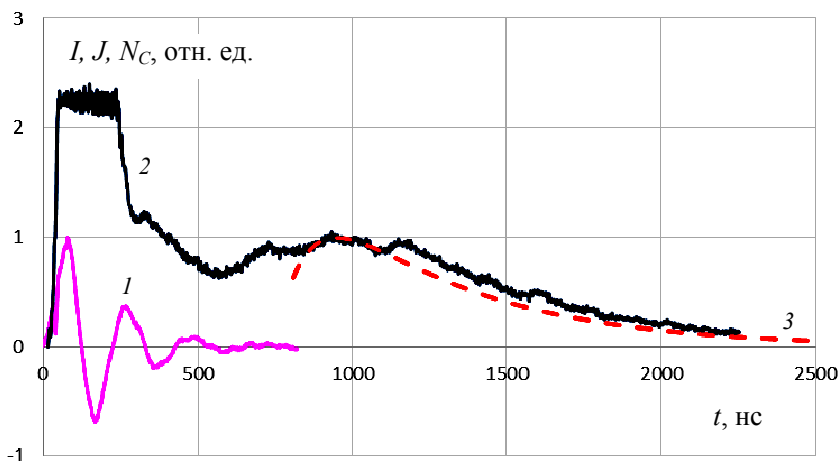


Рис. 2. Ток разряда (1), интенсивность излучения около фронта ударной волны (2), концентрация излучающего состояния молекулы азота (расчет) после взаимодействия с фронтом ударной волны (3). Число Маха ударной волны 3,2, давление перед фронтом 20 Торр. Фронт ударной волны внутри разрядного объема на расстоянии 5 мм от края.

Заключение

В проведенных экспериментах при числах Маха ударной волны 3—3,5, начальном давлении 10—30 Торр, напряжении 25—30 кВ объёмный разряд инициировался перед фронтом ударной волны при нахождении ударной волны внутри

разрядного объема. При выходе ударной волны за пределы разрядного объема ток проходил по плоскости фронта и каналам поверхностного разряда. Регистрация излучения разряда с наносекундным разрешением показала, что в неподвижном воздухе время затухания свечения разряда близко к времени жизни возбужденного уровня $C^3\Pi_u$ моле-

кулы азота и уменьшается с увеличением давления. В присутствии фронта ударной волны длительность излучения узкой зоны вблизи фронта ударной волны превышала 2000 нс после прекращения тока разряда; затухание свечения носило двухступенчатый характер. Проведенный анализ показал, что динамика излучения при взаимодействии разряда с плоской ударной волной может быть обусловлена заселением излучающего состояния в условиях повышенной при ударном сжатии концентрации молекул азота в метастабильном состоянии $A^3\Sigma_u^+$.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-02417) с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития МГУ до 2020 года.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zheltovodov A. A. Development of the studies on energy deposition for application to the problems of supersonic aerodynamics. — Novosibirsk, 2002. Preprint No. 210-2002.
2. Macheret S. O., Ionikh Y. Z., Chernysheva N. V., Yalin A. P., Martinelli L. and Miles R. B. // *Physics of Fluids*. 2001. Vol. 13. No. 9. P. 13.
3. Cicala G., Bruno D., Capitelli M., Longo S. and Rain`o A. C. // *Eur. Phys. J.* 2010. Vol. D 57. P. 375.
4. Знаменская И. А., Мурсенкова И. В., Орлов Д. М., Сысоев Н. Н. // *Письма в ЖТФ*. 2007. Т. 33. Вып. 13. С. 72.
5. Znamenskaya I. A., Koroteev D. A., Lutsky A. E. // *Physics of Fluids*. 2008. Vol. 20. P. 056101-1.
6. Лапушкина Т. А., Ерофеев А. В. // *Письма в ЖТФ*. 2015. Т. 41. Вып. 5. С. 35.
7. Королев Ю. Д., Месяц Г. А. *Физика импульсного пробоя газов*. — М.: Наука, 1991.
8. Тарасенко В. Ф., Бакит Е. Х., Ломаев М. И., Рыбка Д. В., Сорокин Д. А. // *ЖТФ*. 2013. Т. 83. Вып. 8. С. 29.
9. Иванов С. Н., Лисенков В. В., Шпак В. Г. // *ЖТФ*. 2008. Т. 78. Вып. 9. С. 64.
10. Соколова М. В., Никитин А. М., Кривов С. А., Лазукин А. В., Ребров И. Е., Малашин М. В., Небогаткин С. В. // *Прикладная физика*. 2015. № 5. С. 35.
11. Архипов Н. О., Знаменская И. А., Мурсенкова И. В. и др. // *Вестн. Моск. ун-та. Серия 3. Физ., Астрон.* 2014. № 1. С. 88.
12. Карлов Н. В., Кузьмин Г. П., Прохоров А. М. // *Известия АН СССР. Сер. Физическая*. 1984. Т. 48. № 7. С. 1430.
13. Баранов В. Ю., Борисов В. М., Христофоров О. Б. // *Квантовая электроника*. 1981. Т. 8. № 1. С. 165.
14. Belysheva I., Mursenkova I., Chvyreva A. // *Journal of Physics: Conference Series*. 2014. Vol. 516. No. 1. P. 012021.
15. Pancheshnyi S. V., Starikovskaya S. M., Starikovskii A. Yu. // *Chemical Physics*. 1998. Vol. 294. P. 523.
16. Верещагин К. А., Смирнов В. В., Шахатов В. А. // *ЖТФ*. 1997. Т. 67. Вып. 5. С. 34.
17. Лебедев Ю. А., Шахатов В. А. // *Физика плазмы*. 2006. Т. 32. № 1. С. 58.
18. Nagaraja S., Yang V. and Adamovich I. J. // *Phys. D: Appl. Phys.* 2013. Vol. 46. P. 13.

Features of a radiation of the nanosecond volume discharge interacting with a plane shock wave in air

A. Yu. Kuznetsov and I. V. Mursenkova

M. V. Lomonosov Moscow State University
Bld. 2, 1 Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia
E-mail: kuznecov.alexander15@gmail.com; murs_i@physics.msu.ru

Received May 11, 2016

A radiation of the combined volume discharge with plasma electrodes of 300 ns duration is investigated experimentally in the airflow including shock wave front either inside or outside discharge volume (after the shock wave exit from the discharge volume). Registration of the discharge radiation with nanosecond resolution was carried out at Mach numbers 3—3.5 of shock waves and the initial pressure of 10—30 Torr and the voltage of 25—30 kV. Two-stage nature of the decay of the plasma radiation of more than 2000 ns duration after the interaction with the shock wave is found. We analyzed the kinetic processes that lead to a prolonged radiation of a narrow band near the shock wave front after the termination of the discharge current.

PACS: 52.80.-s, 52.30.-q

Keywords: nanosecond volume discharge, radiation dynamics, decay time, electron-optical camera, plane shock wave.

REFERENCES

1. A. A. Zheltovodov, *Development of the studies on energy deposition for application to the problems of supersonic aerodynamics* (Preprint No. 210-2002, Novosibirsk, 2002).
2. S. O. Macheret, Y. Z. Ionikh, N. V. Chernysheva, A. P. Yalin, L. Martinelli and R. B. Miles, *Physics of Fluids* **13** (9), 13 (2001).
3. G. Cicala, D. Bruno, M. Capitelli, S. Longo and A. C. Rain`o, *Eur. Phys. J.* **D 57**, 375 (2010).
4. I. A. Znamenskaya, I. V. Mursenkova, D. M. Orlov and N. N. Sysoev, *Technical Physics Letters* **33**, 575 (2007).
5. I. A. Znamenskaya, D. A. Koroteev, and A. E. Lutsky, *Physics of Fluids*. **20**, 056101–1 (2008).
6. T. A. Lapushkina and A. V. Erofeev, *Technical Physics Letters* **41**, 225 (2015).
7. Yu. D. Korolev and G. A. Mesyats, *Physics of Pulsed Breakdown in Gases* (Nauka, Moscow, 998) [in Russian].
8. V. F. Tarasenko, E. K. Baksht, M. I. Lomaev, D. V. Rybka, and D. A. Sorokin, *Technical Physics* **58**, 1115 (2013).
9. S. N. Ivanov, E. A. Litvinov, and V. G. Shpak, *Tech. Phys. Lett.*, **32**, 745 (2006).
10. M. V. Sokolova, A. M. Nikitin, S. A. Krivov, A. V. Lazukin, I. E. Rebrov, M. V. Malashin, and S. V. Nebogatkin, *Prikl. Fiz.*, No. 5, 35 (2015).
11. N. O. Arkhipov, I. A. Znamenskaya, I. V. Mursenkova and I. Yu. Ostapenko, *Moscow University Physics Bulletin*, No. 1, 96 (2014).
12. N. V. Karlov, G. P. Kuz'min, and A. M. Prokhorov, *Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Fiz.* **48**, 1430 (1984).
13. V. Yu. Baranov, V. M. Borisov, and O. B. Khristoforov, *Quantum Electronics*, **8**, 165 (1981).
14. I. Belysheva, I. Mursenkova, and A. Chvyreva, *Journal of Physics: Conference Series*, **516**, 012021 (2014).
15. S. V. Pancheshnyi, S. M. Starikovskaia, and A. Yu. Starikovskii, *Chemical Physics*. **294**, 523 (1998).
16. K. A. Vereshchagin, V. V. Smirnov, and V. A. Shakhatov, *Technical Physics*, No. 5, 42, 487 (1997).
17. Yu. A. Lebedev, V. A. Shakhatov, *Plasma Phys. Rep.*, **32**, 56 (2006).
18. S. Nagaraja, V. Yang and I. J. Adamovich, *Phys. D: Appl. Phys.* **46**, 13 (2013).